



(19) BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES

PATENTAMT

## (12) Offenlegungsschrift

(10) DE 42 24 601 A 1

(51) Int. Cl. 5

G 12 B 1/00

G 02 B 26/00

G 02 B 26/08

// G 01 B 21/00

## (71) Anmelder:

Somatel Sondermaschinenbau Teltow GmbH, 14513  
Teltow, DE

## (74) Vertreter:

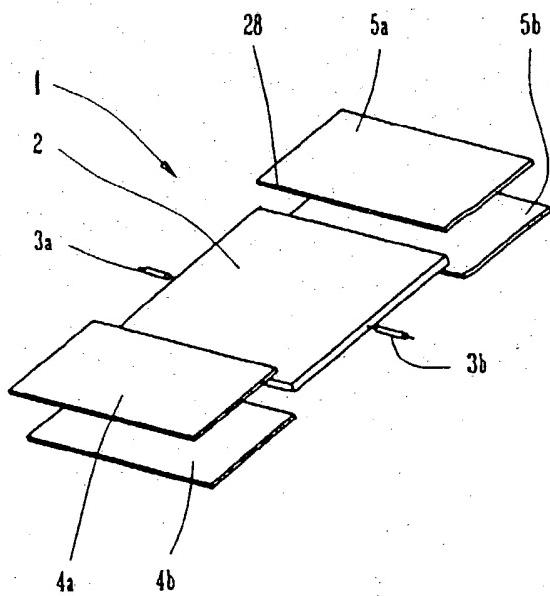
Hansmann, A., Dipl.-Wirtsch.-Ing.; Vogeser, W.,  
Dipl.-Ing., Pat.-Anwälte, 81369 München; Boecker,  
J., Dipl.-Ing. Dr.-Ing., Pat.- u. Rechtsanw., 60313  
Frankfurt; Alber, N., Dipl.-Ing. Univ.  
Dipl.-Wirtsch.-Ing.Univ; Strych, W., Dr.rer.nat.,  
Pat.-Anwälte, 81369 München

## (72) Erfinder:

Erfinder wird später genannt werden

## (54) Elektrostatische Positionierungseinrichtung

(57) Die Erfindung betrifft eine elektrostatische Positionierungseinrichtung, vorzugsweise zur Anwendung bei einem optischen und/oder meßtechnischen Gerät, mit einem beweglichen, im wesentlichen plattenförmigen Element, das unter dem Einfluß der Kraftwirkung eines, durch mehrere, relativ zu dem beweglichen Element fest angeordnete Elektroden erzeugten elektrostatischen Feldes in seiner Lage veränderbar ist. Dabei ist mindestens eine der das plattenförmige Element mittels elektrostatischer Kräfte antreibenden Elektroden (4a bis 13b, 20a bis 27b) derart angeordnet, daß sie eine das plattenförmige Element antreibende Kraftwirkung mit einer Komponente in einer Richtung erzeugen, welche in diejenige geometrische Ebene fällt, in die die Richtungen der maximalen Erstreckungen des plattenförmigen Elements fallen. Ferner ist das plattenförmige Element mindestens in Antriebsrichtung nachgiebig gelagert.



DE 42 24 601 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine elektrostatische Positionierungseinrichtung der im Oberbegriff des Anspruchs 1 angegebenen Art.

5 Derartige Einrichtungen können insbesondere als Ablenk-Einheit für optische Systeme benutzt werden, um unter Ausnutzung elektrostatischer Kräfte einen Spiegel in unterschiedliche Stellungen zu führen.

Kraftwirkungen im elektrostatischen Feld sind seit langem bekannt und nachgewiesen. Aufgrund der mit größer werdendem geometrischem Abstand quadratisch abnehmenden Kräfte des elektrostatischen Feldes ist 10 eine Nutzung auf Anwendungen mit kleinen Abmessungen beschränkt, zumal auch die notwendigen Kräfte, um bewegliche Elemente anzutreiben, mit zunehmender Masse zunehmen. Nutzungsmöglichkeiten ergeben sich daher insbesondere im Bereich der Mikromechanik, welche auf die bekannten Technologien der Mikroelektronik zurückgreifen kann, mit denen mikromechanische Elemente im  $\mu\text{m}$ -Bereich herstellbar sind.

Aus der EP-B-00 40 302 ist eine elektrostatische Lichtablenkeinheit bekannt, bei der ein plattenförmiges Element eine eindimensionale Torsionsbewegung um eine Achse ausführen kann. Das bewegliche Element wird 15 durch einen anisotropen Ätzprozeß aus einkristallinem Silizium hergestellt. Die antreibende elektrostatische Kraft entsteht dabei durch zwei unter der, eine spiegelnde Oberfläche aufweisenden Torsionsplatte angebrachten Elektroden, wobei die Ansteuerspannungen zwischen den festen Elektroden und der beweglichen, auf dem Bezugspotential liegenden Torsionsplatte anliegen. Die Positionierungseinrichtung besteht aufgrund ihres Herstellungsverfahrens immer aus zwei, separat hergestellten Elementen, die montiert werden müssen.

20 Eine andere elektrostatische Positionierungseinrichtung ist aus der DE-A-33 88 758 bekannt. Hierbei sind mehrere Elektroden unterhalb der anzutreibenden Spiegelplatte angeordnet, wobei durch spezielle Federkonstruktionen eine zweidimensionale Torsionsbewegung möglich ist. Die Torsionsplatte liegt dabei auf einem Loslager, welches den Drehpunkt der Torsionsbewegung definiert. Auch hier sind mindestens die Elektrodenplatte und die Torsionsplatte miteinander zu verbinden. In manchen Fällen ist es sogar nötig, eine Isolierschicht 25 zwischen beiden Platten einzufügen.

Des weiteren ist aus der EP-A 0 00 50 970 eine Vorrichtung bekannt, bei der zwei eindimensionale, in einer Ebene liegende Spiegelemente gegenüber einem Hilfsspiegel angeordnet sind. Hiermit ist zwar die zweidimensionale Ablenkung eines Lichtstrahls möglich, aber es kommt zu größeren Montagetoleranzen und Tonnenverzeichnungen bei der Strahlablenkung.

30 Alle Lösungen weisen den wesentlichen Nachteil auf, daß die Kraftwirkung stets senkrecht zur Ebene der Torsionsplatte gerichtet ist. Auslenkungen in einer in der Ebene der Platte gelegenen Richtung sind nicht möglich.

Andere bekannte Positionierungseinrichtungen, die unter Ausnutzung elektromagnetischer oder piezoelektrischer Effekte arbeiten, haben gegenüber den vorbeschriebenen Anordnungen ebenfalls keine Vorteile. Elektromagnetisch angetriebene Anordnungen haben dazu noch den besonderen Nachteil, daß sie, bedingt durch die Mindestgröße von Permanentmagneten bzw. Spulen, eine Untergrenze für ihre mechanischen Abmaße besitzen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine elektromechanische Positionierungseinrichtung der eingangs genannten Gattung zu schaffen, bei der Bewegungen auch in Richtungen ausgeführt werden können, die in der Ebene der maximalen Erstreckung der anzutreibenden Platte gelegen sind.

40 Diese Aufgabe wird mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

Die Erfindung schließt die Erkenntnis ein, daß durch eine Verlagerung der das elektrostatische Feld erzeugenden, feststehenden Elektroden in einen Bereich, der außerhalb der maximalen Erstreckung des anzutreibenden, beweglichen Elements gelegen ist, dessen Bewegung — mindestens mit einer zusätzlichen Komponente — auch in der Ebene seiner größten Fläche erfolgen kann.

45 Unter der Annahme, daß die räumlichen x- und y-Richtungen in die Ebene des Plättchens fallen, in die auch die Richtungen seiner größten Erstreckungen fallen, können beliebige Positionen in der x-y-Ebene angesteuert werden und es können hiermit bei der optischen Strahlablenkung örtlich unterschiedliche Reflexionseigenschaften des Plättchens gezielt angewählt werden. Damit kann zusätzlich zu einer beliebigen Strahlabsenkung durch Drehung um die x- und/oder y-Achse auch noch eine zusätzliche Modulation des Lichtstrahls erfolgen. Beispiele 50 dazu werden weiter unten näher dargestellt.

Die Ansteurelektroden sind bevorzugt in der Weise angeordnet, daß ihre den Schmalseiten des beweglichen Elements mit einem Abstand zugewandten Stirnseiten von dem Element bei seinen Rotations- oder Translationsbewegungen — vorzugsweise in möglichst kleinem Abstand — passiert werden können.

Insgesamt genügen bereits geringe Feldstärken bzw. geringe Spannungen, um die Bewegung des plattenförmigen Elements und damit dessen gewünschte Position zu erreichen.

Weiterhin ist vorteilhaft, daß die Positionierungseinrichtung derart gestaltet werden kann, daß ihre Herstellung auch als Gesamtsystem ohne zusätzliche Montageprozesse mittel der Technologien der Mikrosystemtechnik (beispielsweise als Batch-Prozeß) in günstiger Weise möglich ist. Dabei ist es, auch im Hinblick auf die Vereinfachung des Herstellungsprozesses der Positionierungseinrichtung von besonderem Vorteil, daß die 60 Elektroden für den Aufbau des zur Ablenkung erforderlichen elektrostatischen Gesamtfeldes in einem Bereich angeordnet sind, das nicht von dem Volumen umfaßt ist, welches das Plättchen während seiner Bewegungsabläufe bestreicht.

Nach einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung besteht die elektrostatische Positionierungseinrichtung aus einem beweglichen, plattenförmigen Element, das im wesentlichen rechteckig ausgebildet ist und von einer Mehrzahl von, vorzugsweise radial gerichteten Federelementen in einer vorbestimmten Ruheposition im Raum gehalten wird.

Die für die Erzeugung des elektrostatischen Feldes erforderlichen Elektroden sind vorteilhafterweise jeweils paarweise gegenüberliegend in einem räumlichen Bereich angeordnet, der in einer in der Ebene der größten

# DE 42 24 601 A1

Erstreckungen des beweglichen Elements verlaufenden Richtungen außerhalb der Projektion dieser größten Erstreckung in einer dazu senkrechten Richtung gelegen sind. Die Elektrodenpaare befinden sich jeweils in fester Position an zwei, einander gegenüberliegenden Schmalseiten der beweglichen Platte.

Die einzelnen, vorzugsweise rechteckig ausgebildeten Elektroden der Elektrodenpaare sind dabei insbesondere jeweils in parallelen Ebenen angeordnet, die sich unter- und oberhalb der von dem beweglichen Element aufgespannten Ebene befinden. Die bewegliche Platte ist bevorzugt an das Bezugspotential der Steuerspannungen angeschlossen, mit denen die Elektroden beaufschlagt werden. Zwischen den genannten Elektroden wird durch die Spannungsbeaufschlagung ein elektrostatisches Feld aufgebaut, durch dessen Kraftwirkung das plattenförmige Element der elektrostatischen Positionierungseinrichtung in der jeweils gewünschten Weise seine Stellung ändert.

Nach einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung sind die Elektroden paarweise an allen vier, die Fläche des beweglichen Elements begrenzenden Seiten angeordnet.

Da die verschiedenen Positionen des beweglichen Elements durch die unterschiedlichen Kombinationen der Spannungsbelegung der einzelnen Elektroden erreichbar sind, kann die Variationsbreite der Positionierung des beweglichen Elements gemäß einer Weiterbildung der Erfindung in günstiger Weise weiter erhöht werden, indem die einzelnen Elektrodenpaare jeweils durch "Stapel" von Elektroden ersetzt sind. Diese Stapel weisen dann bevorzugt untereinander jeweils dieselbe Anzahl von Einzelelektronen auf, wobei die Stapelanordnung in Relation zu dem beweglichen Element bevorzugt symmetrisch ebenfalls derart erfolgt, daß ober- und unterhalb der durch das bewegliche Element aufgespannten Ebene die gleiche Anzahl von Einzelelektronen vorhanden ist. Zwischen den einzelnen Elektroden der Stapel sind dünne Isolierschichten vorhanden, um die einzelnen Elektroden potentialmäßig sicher voneinander zu trennen.

Die Ansteuerung der Elektroden der einzelnen Elektrodenstapel kann dabei für zusätzlich anzusteuernde vertikale Bewegungen (in z-Richtung) oder eine Rotation um die x- oder y-Achse auch nach dem Schrittmotor-Prinzip erfolgen. Dabei werden in Richtung der gewünschten Bewegung zeitlich und räumlich nacheinander die entsprechenden Elektroden eines oder mehrerer Elektrodenstapel mit jeweils einem festen Potential angesteuert. Auf diese Weise wird eine "Digitalisierung" der Bewegung hervorgerufen.

Eine derartige diskontinuierliche Bewegung bei der Positionierung des beweglichen Elements kann durch eine vereinfachte Ausführung auch dadurch erreicht werden, daß innerhalb der Elektrodenstapel alternierend Elektroden fest elektrisch parallel geschaltet sind und die Ansteuerung dieser Elektrodenpaare nacheinander erfolgt.

Ein besonderer Vorteil dieser Anordnung besteht weiterhin darin, daß durch einfaches Umschalten der angesteuerten Elektroden eine diskrete Lageänderung, beispielsweise für Verwendung der Positionierungseinrichtung als Schalter, möglich ist. Für die einzelnen diskreten Positionen sind damit relativ hohe Haltemomente erzeugbar, die aufgrund der geringen Abstände zwischen den Elektroden mit niedrigen Spannungen realisiert werden können.

Nach einer weiteren günstigen Weiterbildung der Erfindung ist das bewegliche, sich zweidimensional erstreckende Element der elektrostatischen Positionierungseinrichtung im wesentlichen kreisförmig ausgebildet. Die zur Positionierung des Elements erforderlichen Elektrodensysteme sind gleichmäßig an seinem Umfang verteilt angeordnet. Die als Paar oder als Stapel angeordneten, flächig ausgebildeten Elektroden besitzen in günstiger Weise an ihrer, dem beweglichen Element zugewandten Seite eine kreisbogenförmige Abschlußkante. Diese Anpassung an die Form des beweglichen Elements ermöglicht eine bessere Anpassung des elektrostatischen Feldes bei gleichzeitig verringerten Abmessungen der elektrostatischen Positionierungseinrichtung.

Entsprechend einer anderen Weiterbildung der Erfindung ist an zwei einander gegenüberliegenden Seiten des beweglichen Elements jeweils ein Elektrodenstapel angeordnet. Um eine reine Torsionsbewegung um die Mittellachse des beweglichen Elements in ein oder zwei Richtungen durchführen zu können, sind die Einzelelektronen innerhalb des Stapels so angeordnet, daß die dem beweglichen Element zugewandten Schmalseiten der plattenförmig ausgebildeten Elektroden auf einem, im wesentlichen kreisförmigen Kurvenabschnitt liegen. Durch diese Elektrodenanordnung wird der Abstand zwischen dem beweglichen Element und den feststehenden Elektroden während eines Positionierungsvorganges nahezu konstant gehalten. Wird der Abstand der Elektroden zu dem beweglichen Element mit größerer Entfernung von der Mittellage verringert, so ist ein Ausgleich des bei größerer Auslenkung des durch die Federelemente der Lagerung bewirkten, steigenden rücktreibenden Moments möglich.

Durch die Wahl der zu verwendenden Federelemente, welche das antriebende Element nach Art einer Verspannung halten, sind Rotations- und Translationsbewegungen des beweglichen Elements einander überlagert ausführbar. Die Federn lassen sich in Konformität mit dem übrigen mikromechanischen Herstellungsvorgang bevorzugt in Mäanderform erzeugen.

Bei bevorzugten Ausführungsbeispielen gemäß der Erfindung ist an der Ober- und/oder Unterseite des beweglichen Elements mindestens ein Funktionselement vorgesehen ist, dessen Eigenschaften in einer Richtung die in einer Ebene des beweglichen Elements gelegen ist, die auch die Richtungen seiner maximalen Erstreckungen enthält, örtlich unterschiedlich sind. Auf diese Weise können die für eine Anwendung jeweils notwendigen oder erwünschten Eigenschaften durch eine überlagerte Verschiebung des Elements in x-y-Richtung ausgewählt werden. Das Funktionselement kann dabei insbesondere einen Reflektor oder Emitter bzw. Sensor für Strahlungs- und/oder Wellenenergie bilden. Gegebenenfalls können auch jeweils verschiedene Bereiche mit Sensor- oder Emittereigenschaften durch Verschieben in Bezug auf eine Blende individuell angewählt werden, so daß aktive und passive Eigenschaften eines Elements nach Bedarf auswählbar sind.

Insbesondere weist eine auf dem beweglichen Element vorgesehene Reflektorschicht in der Ebene, welche die Richtungen seiner maximalen Erstreckungen enthält, lokal unterschiedliche Reflexionseigenschaften auf, so daß eine lokal unterschiedliche Beeinflussung der Richtung, Intensität und/oder Farbe bzw. Wellenlänge der reflektierten Strahlung erfolgen kann. Der Reflektor kann insbesondere auch als Hohlspiegel ausgebildet sein oder

# DE 42 24 601 A1

örtlich unterschiedliche Farbfilter bzw. Absorptionseigenschaften bzw. im Falle eines Sensors unterschiedliche Empfindlichkeit aufweisen.

Durch die Verschiebung des mit elektrischen Kontaktmitteln nach Art eines elektromechanischen Schalters ausgestatteten Funktionselementes in Bezug auf eine sich in x-y-Richtung erstreckende Kontaktmatrix sind galvanische Schaltvorgänge im Mikrobereich ausführbar.

Andere vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet bzw. werden nachstehend zusammen mit der Beschreibung der bevorzugten Ausführung der Erfindung anhand der Figuren näher dargestellt. Es zeigen:

- Fig. 1 die schematische Darstellung einer einfachen Ausführungsform der Erfindung,
  - Fig. 2 das elektrische Prinzip-Schaltbild der in Fig. 1 dargestellten Anordnung,
  - Fig. 3 eine andere vorteilhafte Ausführungsform der Erfindung in schematischer Darstellung,
  - Fig. 4 die schematische Darstellung einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung,
  - Fig. 5 eine weitere vorteilhafte Ausführungsform der Erfindung in schematischer Darstellung,
  - Fig. 6 eine vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung,
  - Fig. 7 die schematische Darstellung eines Details der Erfindung,
  - Fig. 8 eine vorteilhafte Weiterbildung der in Fig. 3 dargestellten Form der Erfindung,
  - Fig. 9 eine günstige Weiterbildung der in Fig. 8 schematisch dargestellten Form der Erfindung sowie
  - Fig. 10 und 11 Details von weiteren vorteilhaften Ausführungsbeispielen der Erfindung.
- Fig. 1 zeigt in perspektivischer Ansicht den prinzipiellen Aufbau einer elektrostatischen Positionierungseinrichtung 1 mit einem beweglichen Element 2, welches durch zwei Federelemente 3a und 3b in einer bestimmten Ruhelage im Raum gehalten wird. Die paarweise an zwei gegenüberliegenden Seitenkanten des Elements 2 angeordneten Elektroden 4a, 4b bzw. 5a, 5b befinden sich in einem Bereich, der in einer in der Ebene der größten Erstreckung des beweglichen Elements 2 verlaufenden Richtung außerhalb der Projektion dieser größten Erstreckung in einer dazu senkrechten Richtung gelegen ist. Die Elektroden 4a, 4b bzw. 5a, 5b sind dabei in Ebenen angeordnet, die sich ober- und unterhalb der von der größten Fläche des beweglichen Elements 2 aufgespannten Ebene und parallel zu dieser erstrecken. Das Element 2 ist rechteckig ausgebildet. Die dem Element 2 zugewandten Seitenkanten 28 der Elektroden 4a, 4b, 5a und 5b verlaufen, der Form des beweglichen Elements angepaßt, geradlinig. Es ist ersichtlich, daß die den benachbarten Schmalseiten der Elektrode zugewandten Stirnkanten des beweglichen Elements 2 durch die entsprechende geometrische Bernessung von dem mit einer vertikalen Komponente angetriebenen Element 2 in kleinem Abstand passiert werden können. Auf diese Weise lassen sich mit Abständen im Mikrometerbereich relativ große Kräfte mit kleinen Spannungen auf das Element 2 übertragen und damit auch große Beschleunigungen erzielen.

Das in Fig. 2 dargestellte elektrische Ersatzschaltbild einer mit zwei Elektrodenpaaren 4a, 4b und 5a, 5b ausgerüsteten Positionierungseinrichtung 1 zeigt das bewegliche Element 2, das im 1. Fall elektrisch leitend ausgebildet ist und dadurch auf ein gewünschtes Potential gelegt werden kann. Dieses Potential bildet somit das Bezugspotential für die vier einstellbaren Spannungsquellen U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>, U<sub>3</sub> und U<sub>4</sub>. Werden geeignete Spannungen an die Elektroden 4a und 5b gelegt, so bilden sich zwei elektrostatische Felder, jeweils zwischen dem beweglichen Element 2 und einer der beiden feststehenden Elektroden aus. Diese erzeugen eine elektrostatische Kraftwirkung in der Art, daß das bewegliche Element 2 bestrebt ist, den Abstand zwischen fester Elektrode und beweglichem Element zu verringern. Durch diese Kraftwirkung wird in diesem Fall eine Verschiebung in Richtung der x-Achse hervorgerufen. Mit einer Änderung der anliegenden Spannungsdifferenz ändern sich die wirkenden Kräfte und es lassen sich kontinuierliche Positionsänderungen erzielen.

Wenn im zweiten Fall das bewegliche Element 2 nicht mit dem Bezugspotential verbunden ist oder aus einem elektrisch nicht- oder schlechtleitenden, aber das elektrostatische Feld gut bündelnden Werkstoff besteht, bildet sich durch die Potentiale der Spannungsquellen U<sub>1</sub> und U<sub>3</sub> ein elektrostatisches Feld zwischen den Elektroden 4a und 5b aus. Auf das in diesem Feld befindliche Element 2 wird dabei eine Rotationskraft ausgeübt, da das bewegliche Element 2 bestrebt ist, dem Feld einen möglichst geringen Widerstand entgegenzusetzen. Es bildet sich ein Kräftegleichgewicht zwischen dem rücktreibenden Moment der Federelemente 3a, 3b und den elektrostatischen Feldkräften aus. Durch die Änderung der anliegenden Spannungsdifferenz, und somit durch die Stärke des elektrostatischen Feldes, ändert sich die Kraftwirkung auf das bewegliche Element 2 und ermöglicht ebenfalls eine kontinuierliche Positionsänderung dieses Elements. Durch die im Vergleich zum ersten Fall sehr viel größeren Elektroden sind entsprechend größere Spannungen nötig, um ein Feld geeigneter Stärke aufzubauen.

Eine rein translatorische Bewegung kann für den Fall des mit einem bestimmten Potential beaufschlagten Elements 2 durch zwei betragsmäßig gleichgroße Spannungen U<sub>1</sub> und U<sub>4</sub> bzw. U<sub>2</sub> und U<sub>3</sub> erzeugt werden. Für den Fall, daß das Element 2 nicht mit einem bestimmten Potential beaufschlagt wird, ist eine translatorische Bewegung durch eine Potentialdifferenz zwischen den Elektroden 4a und 5a bzw. 4b und 5b erreichbar.

Durch geeignete Kombination der Spannungsbelegung der Elektroden 4a, 4b, 5a und 5b sowie die Änderung des Spannungspegels kann das Element 2 der elektrostatischen Positionierungseinrichtung 1 Bewegungen ausführen, bei der translatorische und rotatorische Komponenten beliebig überlagerbar sind. Zum Ausschließen unerwünschter Bewegungskomponenten sind gegebenenfalls zusätzliche Lagerstellen bzw. Führungselemente für das bewegliche Element 2 günstig, die vorzugsweise als unter dem Flächenschwerpunkt des beweglichen Elements 2 angebrachtes (nicht dargestelltes) Loslager (Spitze, Schneide oder dergl.) ausgestaltet ist und die gewünschte Drehachse festlegt. Zum anderen können geeignete leistenförmige Führungen rotatorische Bewegungen ausschließen.

Fig. 3 zeigt als perspektivische Ansicht in schematischer Darstellung eine elektromechanische Positionierungseinrichtung 1, deren bewegliches Element 2 an seiner gesamten Peripherie von paarweise plazierten Elektroden umgeben ist. Diese sind nach dem bezüglich Fig. 1 erläuterten Prinzip angeordnet. Dabei ist es für

# DE 42 24 601 A1

eine in feineren Stufen stufenbare Positionierung des Elements 2 besonders günstig, die Elektrodenpaare je Außenseite des Elements 2 weiter zu untergliedern. Dadurch stehen für den zur Positionierung erforderlichen Aufbau des elektrostatischen Feldes insgesamt acht Elektrodenpaare (6a, 6b), (7a, 7b), (8a, 8b), (9a, 9b), (10a, 10b), (11a, 11b), (12a, 12b) und (13a, 13b) zur Verfügung. Diese Elektrodenanordnung ermöglicht bei geeigneter Ansteuerung drei Translations- und drei Torsionsbewegungen des Elements 2, das durch vier, an seinen Eckpunkten befestigte Federelemente 3 bei spannungslosen Elektroden in seiner Ruhelage fixierbar ist. Durch entsprechende Ansteuerung der Elektroden sind translatorische und rotatorische Bewegungen auch überlagerbar. Möglichkeiten zur Ansteuerung und die sich daraus ergebenden einzelnen Bewegungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Art	Richtung	angesteuerte Elektroden
Translation	x	10a, 10b, 11a und 11b
in	-x	6a, 6b, 7a und 7b
Translation	y	12a, 12b, 13a und 13b
in	-y	8a, 8b, 9a und 9b
Translation	z	7a, 8a, 9a, 10a, 11a, 12a und 13a
in	-z	7b, 8b, 9b, 10b, 11b, 12b und 13b
Rotation um	x	8b, 9b, 12a und 13a oder 8a, 9a, 12b und 13b
Rotation um	y	6b, 7b, 10a und 11a oder 6a, 7a, 10b und 11b
Rotation um	z	9a, 9b, 13a und 13b oder 6a, 6b, 10a und 10b

Eine vorteilhafte Weiterbildung der in Fig. 3 dargestellten Ausführungsform der Erfindung zeigt Fig. 4 in perspektivischer Darstellung. Die in Fig. 3 beschriebenen Elektrodenpaare aus im wesentlichen plattenförmig ausgebildeten Einzelelektroden 6a, 6b bis 13a, 13b sind durch Elektrodenstapel 6 bis 13 ersetzt, um die Variationsbreite für die Positionierung des beweglichen Elements 2 weiter erhöhen zu können. Die Elektrodenstapel 6 bis 13, die seitlich neben dem beweglichen Element 2 gleichmäßig verteilt angeordnet sind, bestehen aus einer Mehrzahl plattenförmiger Elektroden, die in vertikaler Richtung symmetrisch zu der von dem Element 2 aufgespannten Ebene innerhalb des Stapels positioniert sind.

Die Ansteuerung der Elektrodenstapel 6 bis 13 ist bei der Anordnung gemäß Fig. 4 in günstiger Weise nach dem genannten Schrittmotor-Prinzip auch für eine translatorische Vertikalbewegung durchführbar. Dabei werden in Richtung der gewünschten Bewegung zeitlich und räumlich nacheinander die entsprechenden Elektroden eines oder mehrerer Elektrodenstapel mit entsprechenden Spannungen derart beaufschlagt, daß die Schmalseite des Elements 2 jeweils schrittweise in eine Position gelangt, in der diese einer dieser zugewandten Elektrodenfläche benachbart ist. Die Ansteuerung der Elektroden kann dabei mit verschiedenen diskreten Werten so vorgenommen werden, daß eine schrittweise Bewegung des Elements 2 erfolgt.

Werden die Potentiale der Elektroden hingegen kontinuierlich verändert, ist das Element auch in beliebige Zwischenposition führbar und hat den Charakter eines analog positionierbaren Motors.

Der besondere Vorteil dieser Anordnung ist darin zu sehen, daß durch einfaches Umschalten der Potentiale der angesteuerten Elektroden discrete Lageänderungen des beweglichen Elements 2 erzwungen werden können, welche die erfindungsgemäße Positionierungseinrichtung auch für die Auslösung von Schaltvorgängen durch Betätigung z. B. optischer Schaltelemente geeignet machen.

Für eine ausschließlich rotatorische Bewegung des Elements 2 der Positionierungseinrichtung 1 um dessen Achse zu erzeugen, ist die in Fig. 5 gezeigte Ausführungsform der Erfindung vorgesehen. Die Elektrodenstapel 4 und 5 sind parallel zu den Längsseiten des beweglichen Elements 2 angeordnet, wobei die dem Element 2

# DE 42 24 601 A1

zugewandten Schmalseiten der Elektroden auf einer im wesentlichen kreiszylindrisch ausgebildeten Fläche liegen. Durch diese Elektrodenanordnung wird bei einer Torsion des durch die Federelemente 3a und 3b gehaltenen Elements 2 der Abstand zwischen ihm und den festen Elektroden annähernd konstant gehalten. Sind die Elektrodenstapel 4 und 5 jedoch so angeordnet, daß sich der Abstand der einzelnen Elektroden zu dem beweglichen Element mit größerer Auslenkung aus der Mittellage verringert, kann durch die dadurch bewirkte Verstärkung des elektrischen Feldes ein Ausgleich des mit größerer Auslenkung durch die Federelemente 3a, 3b steigenden rücktreibenden Momentes erreicht werden.

Das Element 2 ist an seiner Oberseite mit einem zusätzlichen Funktionselement 14 versehen. Dieses Funktionselement kann aus einer speziellen Beschichtung mit strahlungs- und/oder wellenemittierenden Eigenschaften bestehen oder als Reflektor bzw. Strahler ausgestaltet sein (Einsatzbereich optische Abtastsysteme) sowie sensorische oder aktorische Aufgaben (Einsatzbereich Meßmittel, Schaltelemente) übernehmen.

Eine in Fig. 6 perspektivisch dargestellte vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung besitzt neben den zwei zur Positionierung des beweglichen Elements 2 der Positionierungseinrichtung 1 erforderlichen Elektrodenpaaren (4a, 4b) und (5a, 5b) zwei zusätzliche Meßelektroden 15. Diese erstrecken sich unterhalb des beweglichen Elements 2 in einer zu diesem parallelen Ebene. Sie dienen der kapazitiven Lagemessung des beweglichen Elements 2 und bilden die Voraussetzung für eine Regelung der Positionierungseinrichtung.

Wie in Fig. 7 dargestellt, befindet sich zwischen den einzelnen Elektroden 17 eines Stapsels jeweils eine isolierende Zwischenschicht 18, die die Isolation der jeweiligen Elektroden gegeneinander realisiert und die Position der Elektroden im Raum bestimmt. Die Anordnung von Isolierschichten 18 zwischen den Elektroden 17 ermöglicht über eine gemeinsame Verbindungsleitung 16 in vorteilhafter Weise die Beaufschlagung mehrerer Elektroden mit dem gleichen Spannungspegel  $U_1$ . Neben der hier dargestellten Verknüpfung von jeder dritten Elektrode 17 eines Stapsels mit der gleichen Spannung, ist auch die paarweise Kopplung von Elektroden von jeweils gegenüberliegenden Stapseln günstig, um das bekannte Funktionsprinzip eines elektromagnetischen Schrittmotors auf diesen "elektrostatischen Schrittmotoren" zu übertragen. Das entsprechende Spannungs-Winkel-Diagramm für eine Positioniereinrichtung mit Elektrodenstaplern gemäß Fig. 7 ist in Fig. 11 in schematisierter Form dargestellt. Das zeitlich gestaffelte Anlegen der Spannungen  $U_5$ ,  $U_6$  und  $U_7$  führt zu einer stufenweisen Änderung der Ablenkwinkels  $w$ .

Eine andere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung ist in den Fig. 8 und 9 als Draufsicht bzw. als perspektivische Ansicht schematisiert dargestellt. Danach ist das bewegliche Element 19 der Positionierungseinrichtung 1 im wesentlichen kreisförmig ausgebildet. Es ist an seiner Peripherie gleichmäßig von einer Mehrzahl von Elektroden umgeben und wird durch vier Federn 30 in seiner Position in dem von den Elektroden begrenzten Bereich gehalten. Die Elektroden sind als Elektrodenstapel 20 bis 27 oder als Elektrodenpaare 20a und 20b bis 27a und 27b ausgebildet. Um die Gesamtanordnung in ihren räumlichen Abmessungen besonders klein auszubilden ist es günstig, die einzelnen Elektroden so auszubilden, daß ihre dem Element 19 zugewandten Seiten 29 der Form des Elements 19 weitestgehend angepaßt sind. Dies führt in günstiger Weise zusätzlich zu einer Homogenisierung des elektrostatischen Feldes zwischen Elektroden und Element 19. Für die grundsätzliche Anordnung der Elektroden bezüglich des beweglichen Elements 19 gelten die zu den Fig. 1, 3, 4 und 5 vorstehend angegebenen Erläuterungen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden in den Fig. 1 und 3 bis 9 die elektrischen Verbindungen der Elektroden mit den entsprechenden Spannungsquellen sowie die für den Aufbau der Positionierungseinrichtung erforderlichen mechanischen Halte- und Tragekonstruktionen nicht dargestellt.

Die erfindungsgemäße Einrichtung besitzt je nach Anzahl, Gestaltung und Anordnung der Elektroden und der Federelemente bezüglich des beweglichen Elements folgende wesentliche Vorteile:

- Das bewegliche Element muß nicht leitfähig ausgebildet sein und kann in bis zu sechs unterschiedlichen Freiheitsgraden positioniert werden.
- Es kann grundsätzlich auf Lagerstellen für das bewegliche Element verzichtet werden, da diese Kräfte beidseitig tangential zur Fläche des beweglichen Elements wirken.
- Durch die spezifischen Konstruktionsmerkmale entsteht durch die Feldbündelung an den Kanten des beweglichen Elements und die kleinen mechanischen Abmaße des elektrostatischen Feldes ein großes Drehmoment, so daß auch schon bei niedrigen Spannungen Bewegungen mit einem Hub, der einem Vielfachen des Abstandes zwischen beweglichem Element und Elektroden entspricht, erzeugbar sind.
- Die Positionierungseinrichtung nach Fig. 1 bis 7 kann mit Technologien der Mikroelektronik (vorzugsweise mit auf einkristallines Silizium angewandten Ätzprozessen und Verfahren der chemischen Schichtauftragung) in großer Stückzahl bei geringsten Fertigungstoleranzen montagefrei hergestellt werden.

Es ergeben sich eine Vielzahl Anwendungsmöglichkeiten, die alle Arten von Bereichen umfassen, bei denen es um die Erzeugung von Mikrobewegungen beliebiger Richtung mit großer Präzision geht.

Bei den Fig. 10 und 11 dargestellten bevorzugten Ausführungsbeispielen gemäß der Erfindung ist an der Oberseite des beweglichen Elements mindestens ein Funktionselement vorgesehen, dessen Eigenschaften in einer Richtung die in einer Ebene des beweglichen Elements gelegen ist, die auch die Richtungen seiner maximalen Erstreckungen enthält, örtlich unterschiedlich sind.

Auf diese Weise können die für eine Anwendung jeweils notwendigen oder erwünschten Eigenschaften durch eine überlagerte Verschiebung des Elements in x-y-Richtung ausgewählt werden. Bei dem in Fig. 10 im Schnitt dargestellten Funktionselement handelt es sich um einen Reflektor, der als Hohlspiegel ausgebildet ist.

Bei dieser Anwendung ist das bewegliche Element nicht als Ebene ausgebildet, sondern ist an seiner das Funktionselement aufweisenden Oberfläche konkav gewölbt. Wird dieses in der xy-Ebene kreisförmig angetrieben (Überlagerung von zwei Translationsbewegungen (gemäß  $r^2 = x^2 + y^2$ ), so wird ein einfallender Lichtstrahl

kreisförmig dejustiert. Damit ist es zum Beispiel für einen Beschriftungslaser möglich, die Strichbreite seines Bearbeitungsstrahles bedarfsweise zu vergrößern. In Fig. 10 ist ein Schnitt entlang der xz-Ebene mit zwei Beispiellichtstrahlen dargestellt. Es ist ersichtlich, wie der Lichtstrahl in Abhängigkeit von seinem Einfallsort auf dem Spiegel unterschiedlich ausgelenkt — und damit aufgefächert wird.

In Fig. 11 ist ein Spiegel in Draufsicht dargestellt, der mit örtlich verschiedenen als Farbfilter wirkenden Reflexionsbereichen versehen ist. Diese teilen sich nach dem Dreifarbensystem in Bereich von Rot, Grün und Blau auf drei Sektoren von je  $120^\circ$  auf. Je nach Einfallsort eines zu reflektierenden Lichtstrahls wird dieser unterschiedlich eingefärbt. Auf diese Weise kann ein Lichtstrahl — beispielsweise für Farbbildprojektionen zur Bilddarstellung mittels Neigung des Spiegels ausgelenkt und durch Verschieben des Spiegels in x-y-Richtung jeweils unterschiedlich eingefärbt werden.

Die Erfindung beschränkt sich in ihrer Ausführung nicht auf das vorstehend angegebene bevorzugte Ausführungsbeispiel. Vielmehr ist eine Anzahl von Varianten denkbar, welche von der dargestellten Lösung auch bei grundsätzlich anders gearteten Ausführungen Gebrauch macht.

#### Patentansprüche

1. Elektrostatische Positionierungseinrichtung, vorzugsweise zur Anwendung in einem optischen und/oder meßtechnischen Gerät, mit einem beweglichen, im wesentlichen plattenförmigen Element, das unter dem Einfluß der Kraftwirkung eines, durch mehrere, relativ zu dem beweglichen Element fest angeordnete Elektroden erzeugten elektrostatischen Feldes in seiner Lage veränderbar ist, insbesondere gefertigt unter Einbeziehung eines Substrats aus monokristallinem Silizium,  
dadurch gekennzeichnet,  
daß mindestens eine der das plattenförmige Element mittels elektrostatischer Kräfte antreibender Elektroden (4a bis 13b, 20a bis 27b) derart angeordnet ist, daß sie eine das plattenförmige Element antreibende Kraftwirkung mit einer Komponente in einer Richtung erzeugen, welche in diejenige geometrische Ebene fällt, in die die Richtungen der maximalen Erstreckungen des plattenförmigen Elements fallen, und  
daß das plattenförmige Element mindestens in der Antriebsrichtung nachgiebig gelagert ist.
2. Elektromechanische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektrode in der Ruhestellung des Plättchens einen Abstand zu einer seitlich benachbarten Elektrode aufweist, der mindestens dem vorgesehenen Hubbereich des plattenförmigen Elements in dieser Richtung entspricht.
3. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das bewegliche Element (2, 19) durch an seinen Schmalseiten angeordnete, sich insbesondere in der Ebene der maximalen Erstreckung des beweglichen Elements verlaufende, Federelemente (3, 3a, 3b und 30) gehalten ist.
4. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Federelemente als Zugfedern ausgestaltet sind.
5. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Federelemente an diagonal gegenüberliegenden Eckpunkten des beweglichen Elements angeordnet sind.
6. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektroden (4a bis 13b und 20a bis 27b) jeweils paarweise angeordnet sind, wobei sich eine der Elektroden unterhalb und die andere Elektrode oberhalb der Ebene maximaler Erstreckung des beweglichen Elements (2, 19) befindet.
7. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das bewegliche Element (2) eine im wesentlichen rechteckige Form aufweist.
8. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das bewegliche Element (19) im wesentlichen kreisförmig ausgebildet ist.
9. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der Ansprüche 1 und 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektroden jeweils einander gegenüberliegenden Schmalseiten des beweglichen Elements (2) benachbart angeordnet sind.
10. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das bewegliche Element (2, 19) elektrisch leitende Oberflächenbereiche aufweist.
11. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß an der Ober- und/oder Unterseite des beweglichen Elements (2, 19) mindestens ein Funktionselement (14) vorgesehen ist, dessen Eigenschaften in einer Richtung die in einer Ebene des beweglichen Elements gelegen ist, die auch die Richtungen seiner maximalen Erstreckungen enthält, örtlich unterschiedlich sind.
12. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Funktionselement (14) einen Reflektor oder Emitter bzw. Sensor für Strahlungs- und/oder Wellenenergie bildet.
13. Elektromechanische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Reflektor in der Ebene, welche die Richtungen seiner maximalen Erstreckungen enthält, lokal unterschiedliche Reflexioneigenschaften aufweist, insbesondere zur lokal unterschiedlichen Beeinflussung der Richtung, Intensität und/oder Farbe bzw. Wellenlänge der reflektierten Strahlung.
14. Elektromechanische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Reflektor als Hohlspiegel ausgebildet ist, örtlich unterschiedliche Farbfilter oder Absorptionseigenschaften aufweist.
15. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Funktionselement (14) einen Sensor mit in Abhängigkeit von der Positionierung des beweglichen Elements veränderbarer Empfindlichkeit bildet.

# DE 42 24 601 A1

16. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Funktionselement (14) ein Betätigungs element für einen elektromechanischen Schalter bildet, dessen zusätzlichen Kontakt elemente als Elektroden ausgebildet sind.
17. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der Ansprüche 1 und 6, dadurch gekennzeichnet, daß benachbart zu jeder Seitenkante des beweglichen Elements (2) mindestens eine Elektrode (7a bis 13b) vorgesehen ist.
18. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Mehrzahl von Einzelektroden (17) jeweils stapelartig (6 bis 13 und 20 bis 27), gegebenenfalls mit einem räumlichen Abstand zwischen benachbarten Einzelektroden, angeordnet sind.
19. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektrodenstapel (6 bis 13 und 20 bis 27) rotationssymmetrisch zu einer Achse gelegen sind, die senkrecht zur Ebene der maximalen Erstreckung des beweglichen Elements gerichtet ist bzw. spiegelsymmetrisch zu einer Fläche liegen, die diese Achse enthält.
20. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der Ansprüche 18 und 19, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den einzelnen Elektroden (17) der Stapel (6 bis 13 und 20 bis 27) jeweils ein Isolierkörper (18) vorgesehen ist.
21. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der Ansprüche 18 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Elektroden (17) eines Staps das gleiche elektrische Potential aufweisen.
22. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß einander nicht benachbarte Elektroden (17) eines Staps dasselbe Potential aufweisen.
23. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ober- oder unterhalb der Ebene der größten Erstreckung des beweglichen Elements (2, 19) mindestens eine Meßelektrode (15) zur kapazitiven Positionsbestimmung des beweglichen Elements (2, 19) angeordnet sind.
24. Elektrostatische Positionierungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die dem beweglichen Element (2, 19) zugewandten Seiten (28, 29) der Elektroden der Form der die Oberfläche des beweglichen Elements (2, 19) begrenzenden Kanten angepaßt sind.

Hierzu 11 Seite(n) Zeichnungen

**- Leerseite -**

ZEICHNUNGEN SEITE 1

Nummer:  
Int. Cl. 5:  
Offenlegungstag:

DE 42 24 601 A1  
G 12 B 1/00  
27. Januar 1994

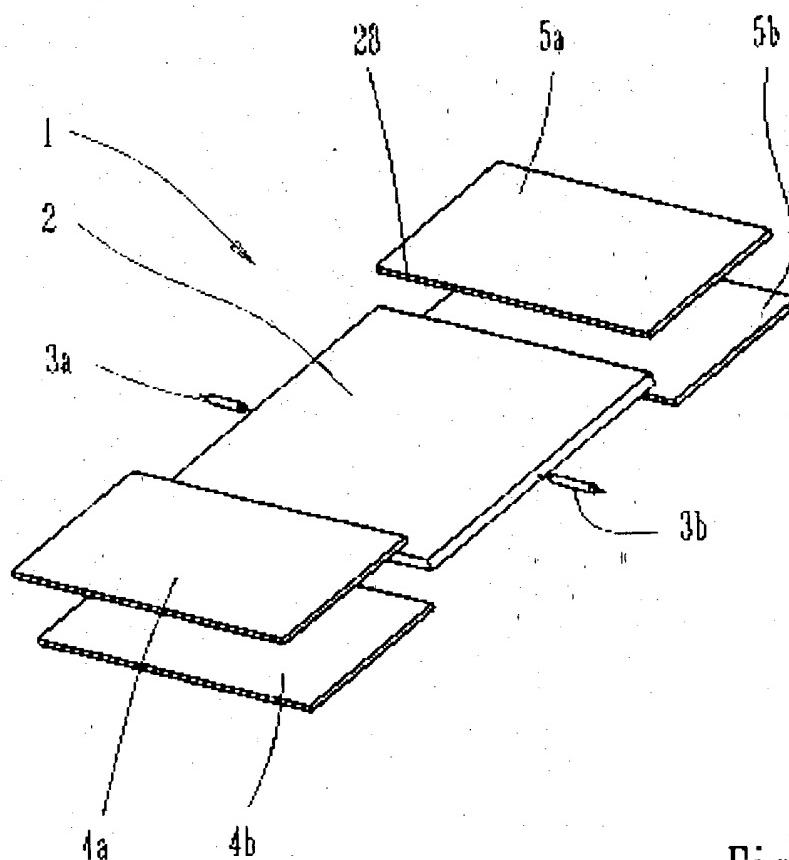


Fig. 1

Fig. 2

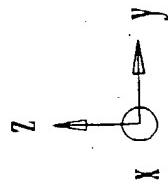
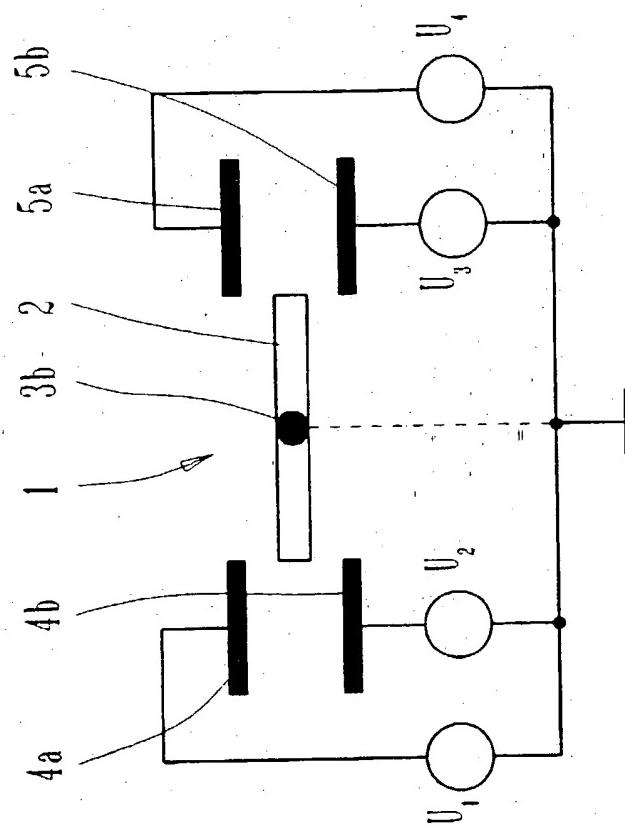
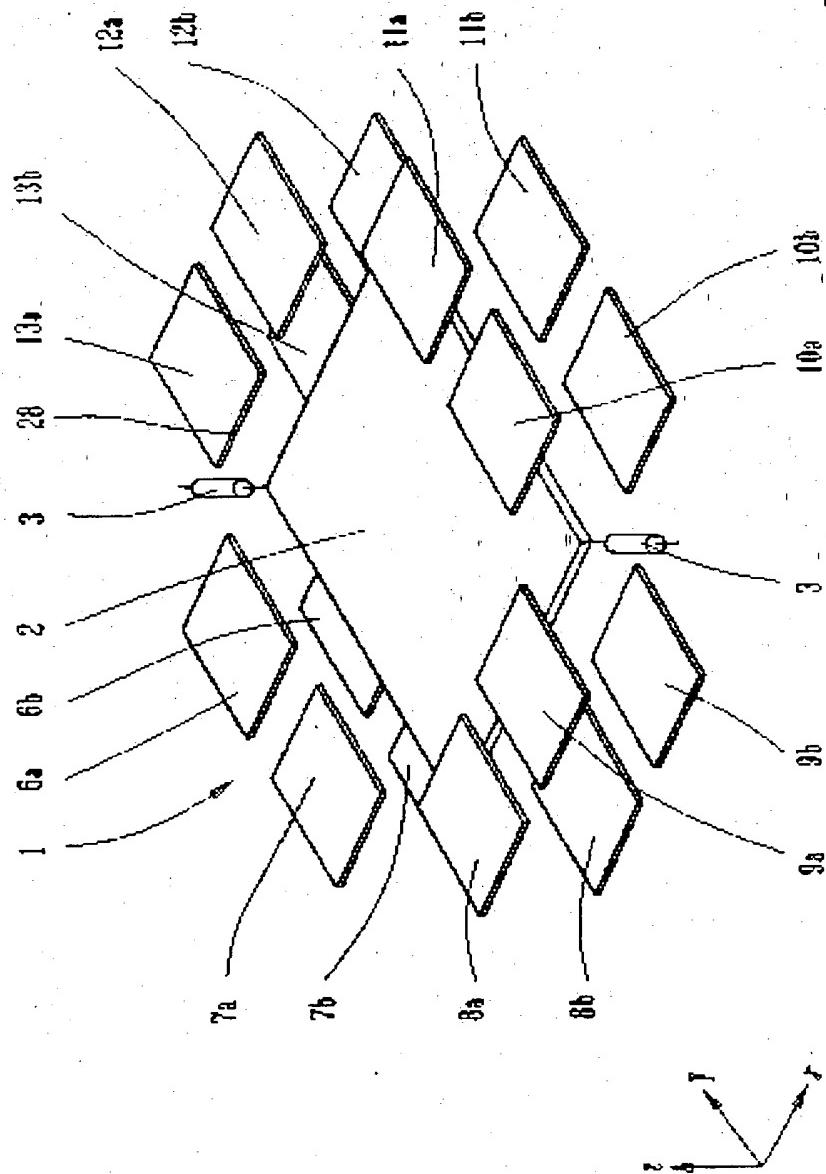


Fig. 3



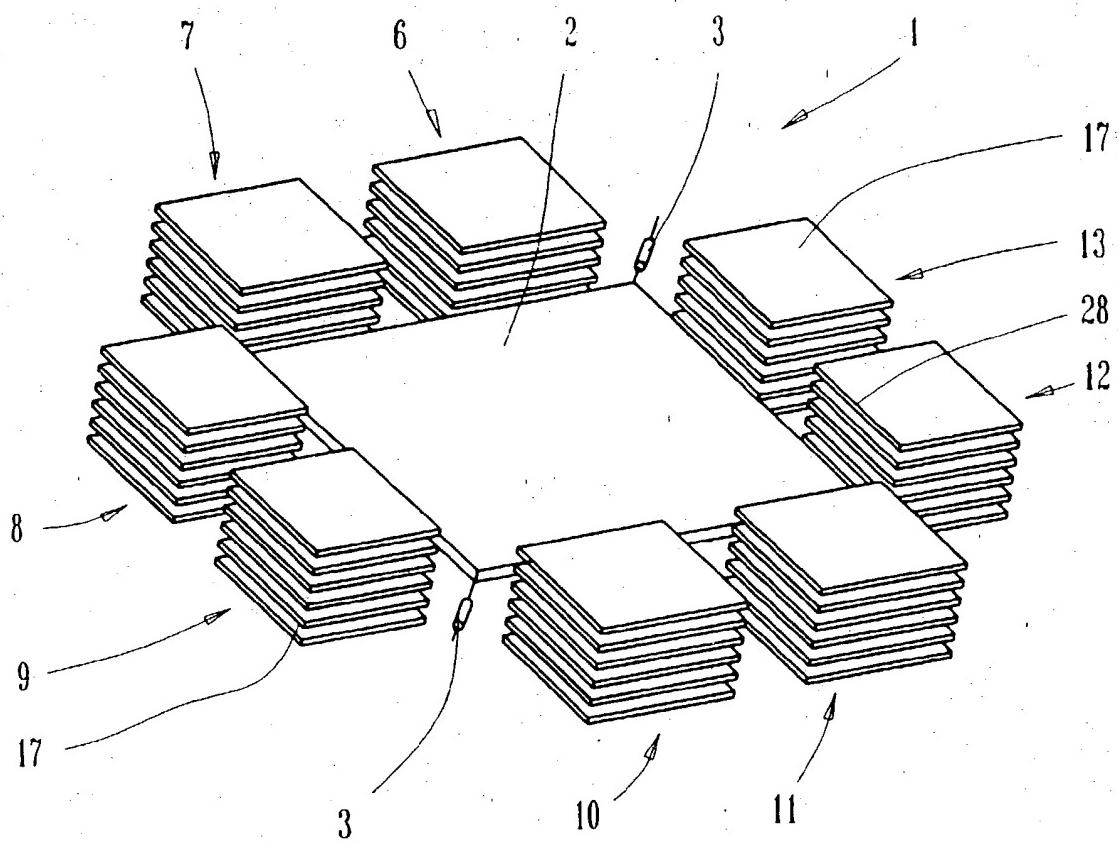


Fig. 4

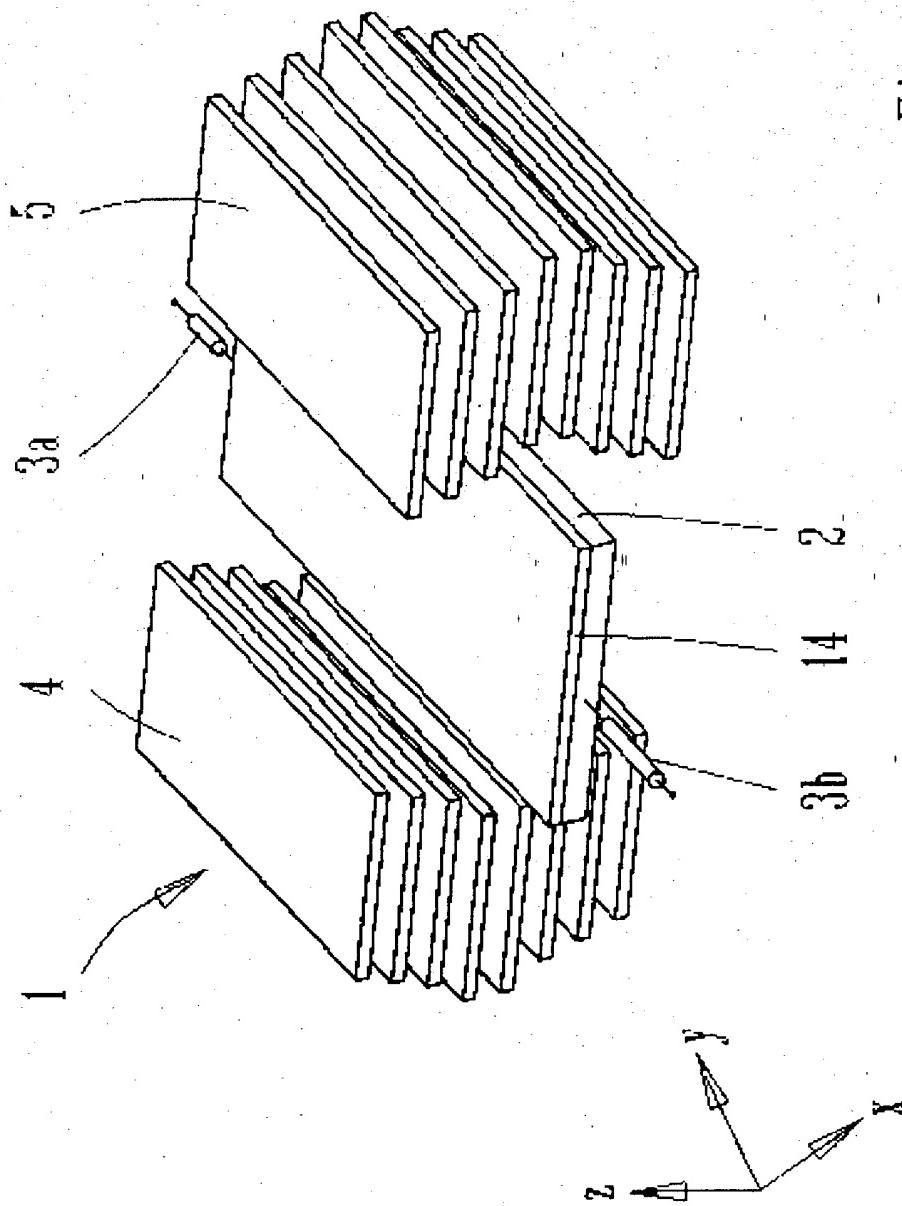


Fig. 5

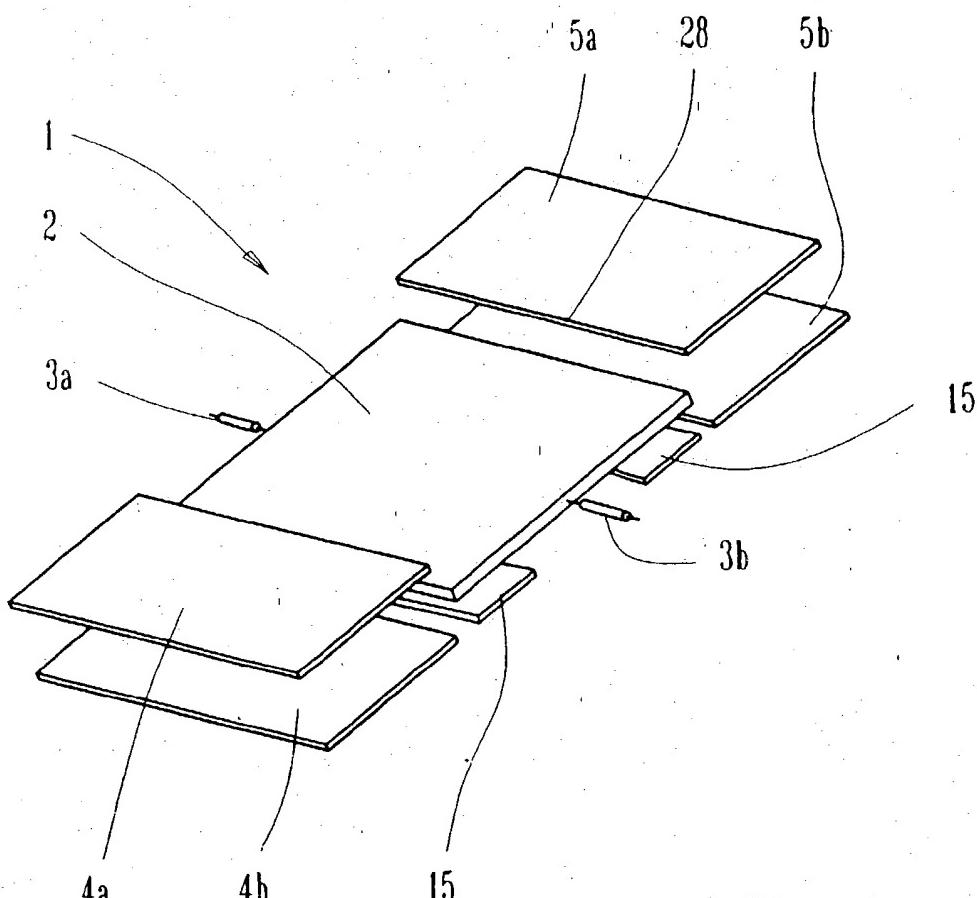


Fig. 6

ZEICHNUNGEN SEITE 7

Nummer:  
Int. Cl. 5:  
Offenlegungstag:

DE 42 24 601 A1  
G 12 B 1/00  
27. Januar 1994

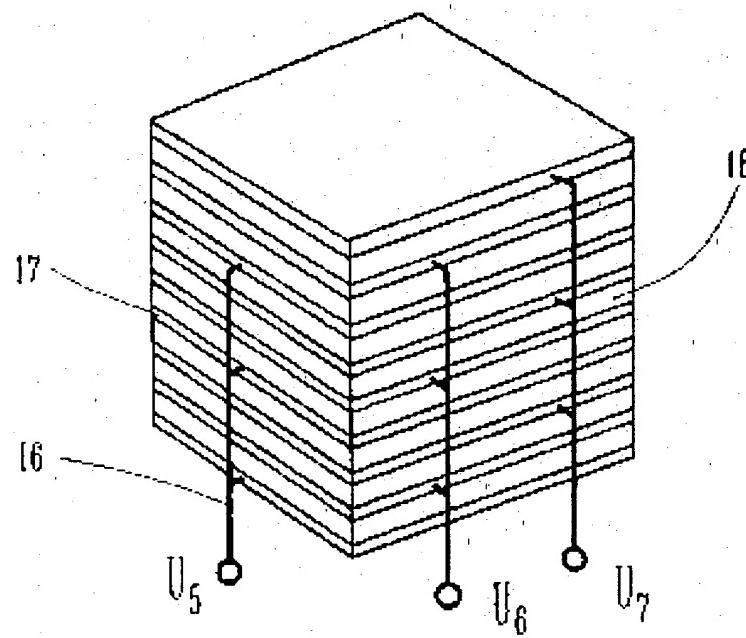


Fig. 7

ZEICHNUNGEN SEITE 8

Nummer:  
Int. Cl. 5:  
Offenlegungstag:

DE 42 24 601 A1  
G 12 B 1/00  
27. Januar 1994

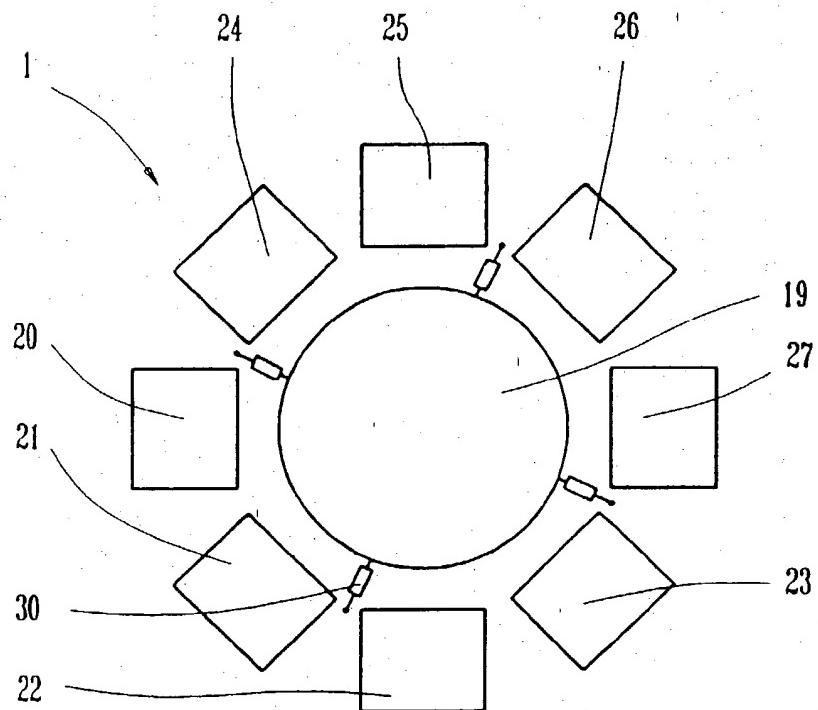
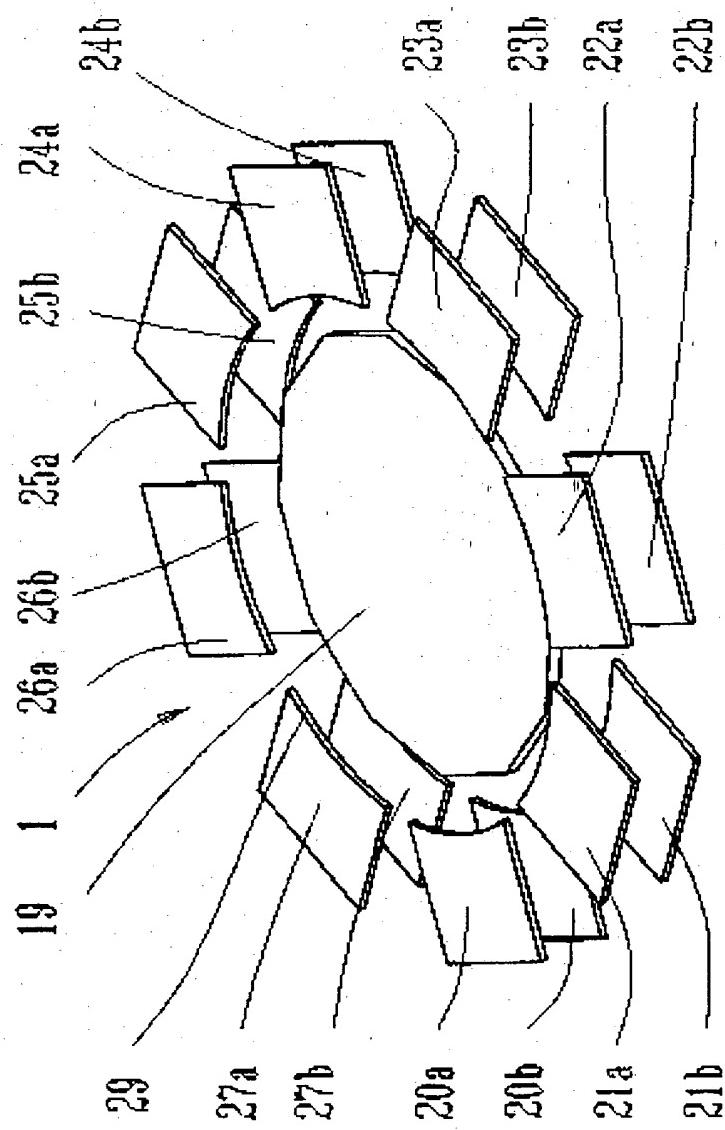


Fig. 8

Fig. 9



ZEICHNUNGEN SEITE 10

Nummer:  
Int. Cl.<sup>5</sup>:  
Offenlegungstag:

DE 42 24 601 A1  
G 12 B 1/00  
27. Januar 1994

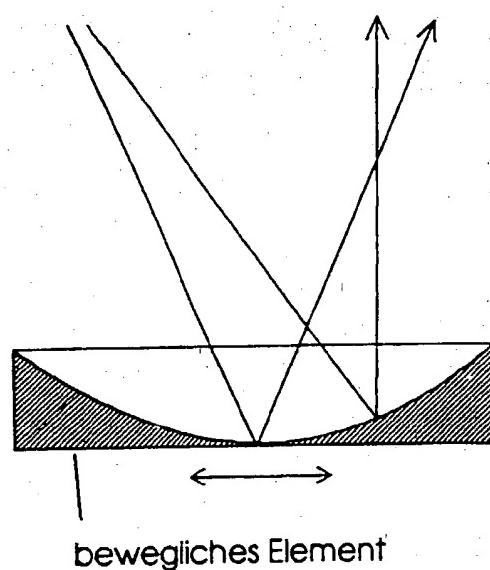


Fig. 10

ZEICHNUNGEN SEITE 11

Nummer:  
Int. Cl. 6:  
Off. Anlegungstag:

DE 42 24 801 A1  
G 12 B 1/00  
27. Januar 1994

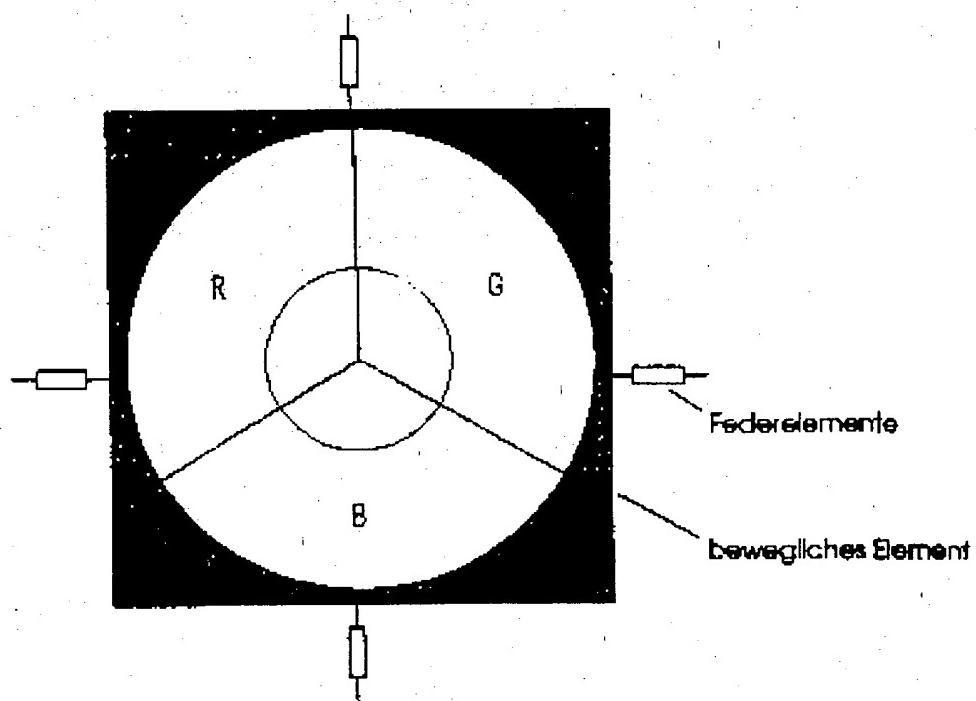


Fig. 11